扩束光学系统的自动温度补偿机构设计

李海波
（中国科学院南京天文仪器有限公司，江苏 南京 210042）

摘要：扩束光学系统对温度有较高的敏感度，为了减小温度对光学系统的影响，设计了一种自动温度补偿机构。该机构通过材料之间热膨胀系数的不同进行相互补偿，从而保证镜间距的稳定性，并且通过 ANSYS 软件分析扩束系统温度从 20℃升高到 30℃，40˚C和 50˚C时，主次镜镜间距的变化量，最后通过 ZMAX 软件对变化后的系统进行光学仿真分析。分析结果表明，不采用自动温度补偿机构设计，扩束光学系统主次镜镜间距分别变化 0.02722mm，0.05443mm 和 0.08164mm，系统波前误差均方根(Root Mean Square，RMS)从 0.0013λ 变为 1.3898λ、2.7782λ、4.1656λ（λ=632.8nm），无法满足光学成像质量要求；而采用自动温度补偿结构设计后，扩束光学系统主次镜镜间距分别变化 0.00005mm，0.00009mm 和 0.00014mm，系统波前误差均方根从 0.0013λ 分别变为 0.0026λ，0.0046λ 和 0.0072λ，仍然可以满足光学成像质量要求。因此该自动温度补偿机构可以有效地抑制大温差对扩束光学系统成像质量的影响。

关键词：扩束光学系统；自动温度补偿机构；镜间距；ANSYS；ZMAX；系统波前误差
中图分类号：TN216　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1672-7676（2023）01

Design of automatic temperature compensation mechanism for beam expanding optical system

Li Haibo
(CAS Nanjing Astronomical Instruments Co.,LTD.Nan jing 210042,China, Email:hbli@nairc.ac.cn)

Abstract: The beam expanding optical system is highly sensitive to temperature. In order to reduce the influence of temperature on the optical system, an automatic temperature compensation mechanism is designed. The mechanism compensates each other through the difference of thermal expansion coefficient between materials, thus ensuring the stability of mirror spacing. And ANSYS software is used to analyze the change of primary and secondary mirror spacing when the beam expansion system temperature rises from 20℃ to 30℃, 40℃, 50℃. Finally, the optical simulation analysis of the changed system is carried out by ZMAX software. The analysis results show that without the design of automatic temperature compensation mechanism, the distance between primary and secondary mirrors of the beam expansion system optical system changes 0.02722mm, 0.05443mm, 0.08164mm respectively, and the system wavefront error RMS changes from 0.0013λ to 1.3898λ, 2.7782λ, 4.1656λ (λ= 632.8nm), unable to meet the requirements of optical imaging quality; After the automatic temperature compensation structure is adopted, the primary and secondary mirror spacing of the beam expanding optical system changes 0.00005mm, 0.00009mm and 0.00014mm respectively, and the system wavefront error RMS changes from 0.0013λ to 0.0026λ, 0.0046λ, 0.0072λ. It can still meet the requirements of optical imaging quality. Therefore, the automatic temperature compensation mechanism can effectively restrain the influence of large temperature difference on the imaging quality of the beam expanding optical system.

Key words: beam expanding optical system; automatic temperature compensation mechanism; mirror spacing; ANSYS; ZMAX; system wavefront error

---

基金项目：国家自然科学基金（12141304）资助.
收稿日期：2022-09-20；修订日期：2022-10-10
作者简介：李海波，男，工程师，主要研究望远镜总体设计. Email:hbli@nairc.ac.cn

扩束光学系统[1]作为激光通信、激光测距等技术领域重要组成部分，已经在天文观测、卫星通信、全球定位系统、国防建设等领域发挥了重大作用。为满足激光测距系统的使用需求，文[2]设计了一套 2~6倍的透射式连续变倍系统。文[3]设计完成了一个离轴三反系统，通过调节二镜和三镜实现光学变倍，反射镜均采用非球面。扩束光学系统广泛应用的同时，稳定性要求也在不断提升。然而大温差环境对扩束光学系统的稳定性有很大的影响。主要因为热胀冷缩是绝大多数材料的固有属性，在温度变化较大的工作环境下，各构件内部不均匀的热应力将导致复杂的热应变产生，引发光学元件的热失调，降低设备的光学性能[4]。支撑结构变形引起的光学元件位置偏差[5]一直是困扰研发人员和工程设计人员的难题之一。因此越来越多的人开始从结构设计本身出发改善光学系统的温度稳定性。2016年，文[6]通过设计电机控制系统来完成系温度补偿，该方法可以有效控制系统的温度范围，但是系统温度的均匀性不容易保证，系统成像质量受到影响。2021年文[7]在低温离轴反射式准直系统中设计的温度补偿机构可以明显提高光学系统的温度稳定性,该机构通过殷钢的低膨胀系数进行补偿，并没有设计反向温度补偿机构，系统成像质量依然受到较大影响。

在研制 200mm 口径激光发射扩束系统过程中,研究人员发现温度大范围变化对扩束光学系统的像质有很大影响,无法满足系统波像差进而影响设备的通信功能。为了解决这一问题,本文设计了一种自动温度补偿机构，该机构设计有反向温度补偿装置，根据不同材料膨胀系数以及膨胀方向的不同，并通过理论计算，设计相应的机械结构及长度，使得在 30℃范围内镜间距随温度总变化量趋近 0，从而抑制一定范围温度变化对扩束光学系统像质的影响。并且在＋30℃温差范围内,通过 ANSYS 软件分析了自动温度补偿机构对扩束光学系统主次镜位置的影响，然后通过 ZMAX 软件对变化后的主次镜进行光学仿真分析。分析结果表明，自动温度补偿机构可以减小温度改变对主次镜镜间距的影响,有效地抑制温度变化对扩束光学系统成像质量的影响。

1 扩束系统自动温度补偿机构机理

扩束光学系统指标：口径 200mm，扩束比为 16X，装调后实现系统轴上波前 RMS≤λ/20@632.8nm。本系统采用同轴无实焦点设计，12.5mm 直径的激光束入射到次镜，经过次镜及主镜的反射后，形成 200mm 直径激光束向外发射，配合接收望远镜可实现激光的发射及接收。

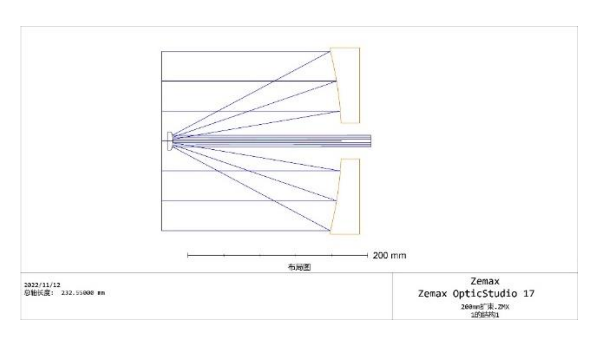


图 1 16x 扩束系统图

Fig.1 16x beam expansion system diagram

表 1　镜面参数

Table 1　Mirror parameters

Components	Radius of curvature	Aspheric coefficient	Distance between primary and secondary mirrors	Mirror diameter
Primary mirror	400	-1	187.4998	208
Secondary mirror	25	-1		17.5

主镜、次镜以及窗口镜之间的相互位置关系对扩束系统的光学成像质量有很大的影响，为了安装窗口镜、主镜、次镜，并保持相互位置关系，扩束系统结构设计如图 2。系统主要由镜筒机构、窗口镜机构、次镜机构、主镜机构、后罩壳机构、自动温度补偿机构等组成。镜筒机构主要由 Q235 材料焊接而成，作为系统主支撑件，用于安装其他机构；窗口镜安装于窗口镜机构中，与镜筒机构相连；主镜安装于主镜室内，主镜室设计有侧支撑机构，机构处通过聚四氟乙烯结构与主镜接触，通过镜室钢结构、主镜微晶玻璃、侧支撑聚四氟乙烯之间温度膨胀系数的不同，可实现自动温度补偿，减小结构受温度影响对主镜的力学作用，并与镜筒相连。次镜与殷钢副镜室胶粘，安装在次镜机构，次镜机构与温度补偿机构相连，与镜筒隔开，次镜位置设计有五维调整机构，确保主次镜之间光学系统的调试功能。

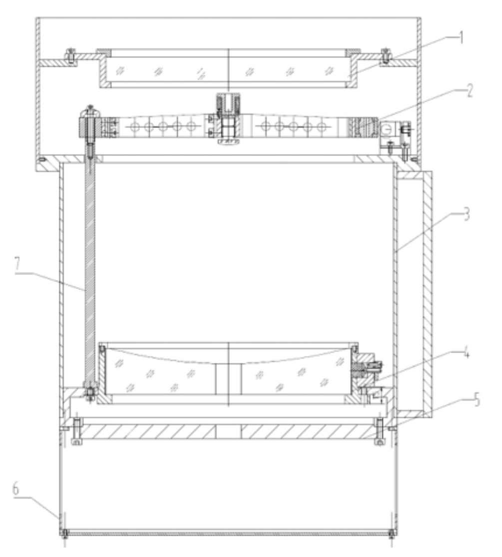


图 2 扩束系统镜筒结构示意图

Fig.2 Structure Diagram of Beam Expanding System Lens Tube

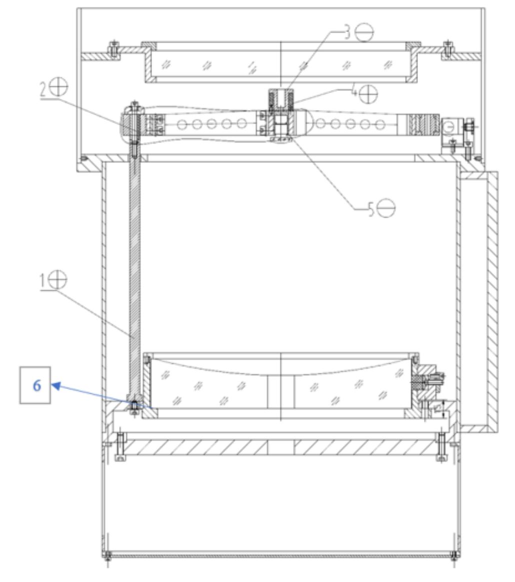


图 3 扩束系统温度补偿机构示意图

Fig.3 Schematic diagram of temperature compensation mechanism of beam expansion system

扩束光学系统成像质量受温度影响较大，为了减小温度对系统成像质量的影响，在主次镜之间使用殷钢（牌号：4J32）材料的连接机构，在次镜位置处设计了铝材料的温度反向补偿机构，结构如图 3。图 3 中，殷钢杆部件 1、次镜钢机构 2、反向补偿铝部件 3、殷钢隔圈部件 4、殷钢次镜室部件 5 等结构部件对温度补偿起主要作用。殷钢杆部件 1 采用低膨胀殷钢材料，主要用于减小主次镜受温度影响镜间距的变化量。次镜钢机构 2 用于安装次镜及反向补偿铝部件 3；反向补偿铝部件 3 选用热膨胀系数大的铝材料，用于温度反向补偿；殷钢隔圈部件 4 用于减小正向膨胀；殷钢次镜室部件 5 选用低膨胀殷钢材料，用于安装次镜，减小温度变化对次镜的影响。部件材料类型及其属性如表 2。设定 6 处为温度变化基准面，当温度升高时，殷钢杆部件 1、次镜钢机构 2、殷钢隔圈部件 4 将沿 + z 方向膨胀，而反向补偿铝部件 3 和殷钢次镜室部件 5 将沿 - z 方向膨胀。通过殷钢杆部件 1、次镜钢机构 2、殷钢隔圈部件 4 与反向补偿铝部件 3、殷钢次镜室部件 5 之间温度膨胀系数以及膨胀方向的不同，设计相应的结构长度，并通过理论计算总变化量趋近 0，从而产生自动温度补偿的效果。

通过该结构可以极大地抑制温度变化对主次镜镜间距的影响，确保光学系统的成像质量。

金属材料的热膨胀公式为

$$\Delta l = \alpha \times L \times (T_1 - T_0) \,, \tag{1}$$

其中，Δl为材料轴向伸长，单位 mm; α为材料线性膨胀系数；L 为材料长度，单位 mm;T_0为材料初始温度，单位℃；T_1为材料工作温度，单位℃。镜间距变化量为

$$\Delta Z = \alpha_1 \times L_1 \times (T_1 - T_0) + \alpha_2 \times L_2 \times (T_1 - T_0) + \alpha_1 \times L_4 \times (T_1 - T_0) - \alpha_3 \times L_3 \times (T_1 - T_0) - \alpha_1 \times L_5 \times (T_1 - T_0) , \tag{2}$$

其中，α_1为殷钢线性膨胀系数；α_2为钢线性膨胀系数；α_3为钢线性膨胀系数；L_1为殷钢杆部件 1 长度;L_1为殷钢杆部件 1 长度;L_2为次镜钢机构 2 长度;L_3为反向补偿铝部件 3 长度;L_4为殷钢隔圈部件 4 长度；L_5为殷钢次镜室部件 5 长度。

2　系统温度变化分析

2. 1　系统参数设置

各零件的热膨胀系数及长度如表 2。

表 2　结构件参数

Table 2　Frame parameters

Type	Material	Length(mm)	Coefficient of thermal expansion（X10-7/℃）
1 Invar bar parts	4J32	215	5
2 Secondary mirror steel mechanism	45#	26	122
3 Reverse compensation aluminum parts	6061	17.6	240
4 Invar spacer parts	4J32	17.6	5
5 Components of invar secondary mirror chamber	4J32	19.5	5

2. 2　系统温度分析结果

设定 20℃为系统参考温度，通过 ANSYS 有限元分析软件，分析了镜筒在 30℃，40℃和 50℃时，扩束系统主次镜之间的相对位置变化，分析中定义光轴为 *z* 方向，坐标系基准如图 4。主次镜之间的相对位置通过最小二乘法拟合镜面球心坐标的方法，计算出主次镜相对偏移量。由于自动温度补偿机构是轴对称结构，受温度影响，*x* 轴和 *y* 轴方向主次镜位置变化基本为 0,因此分析中忽略了 *x* 轴方向和 *y* 轴方向主次镜位置变化带来的影响。主要分析 *z* 轴方向上主、次镜球心相对偏移量，然后将主、次镜相对变化量带入到 ZMAX 中进行光学仿真，计算该温差下激光扩束系统的波前误差。

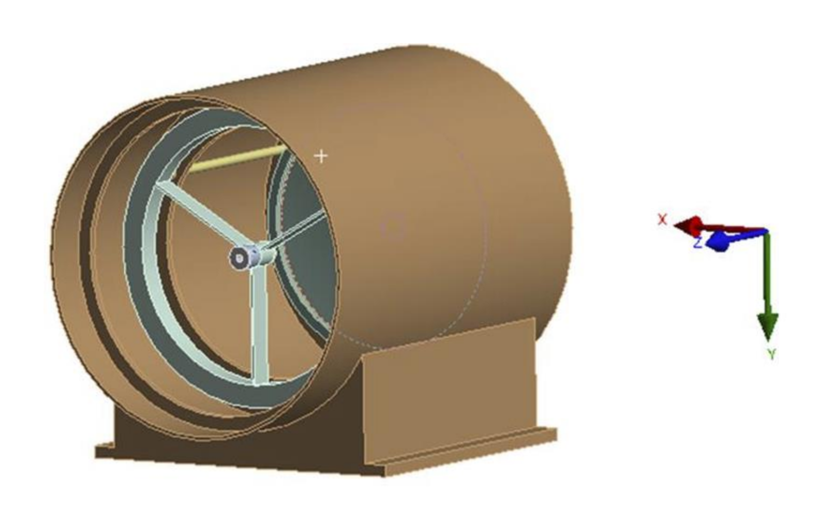
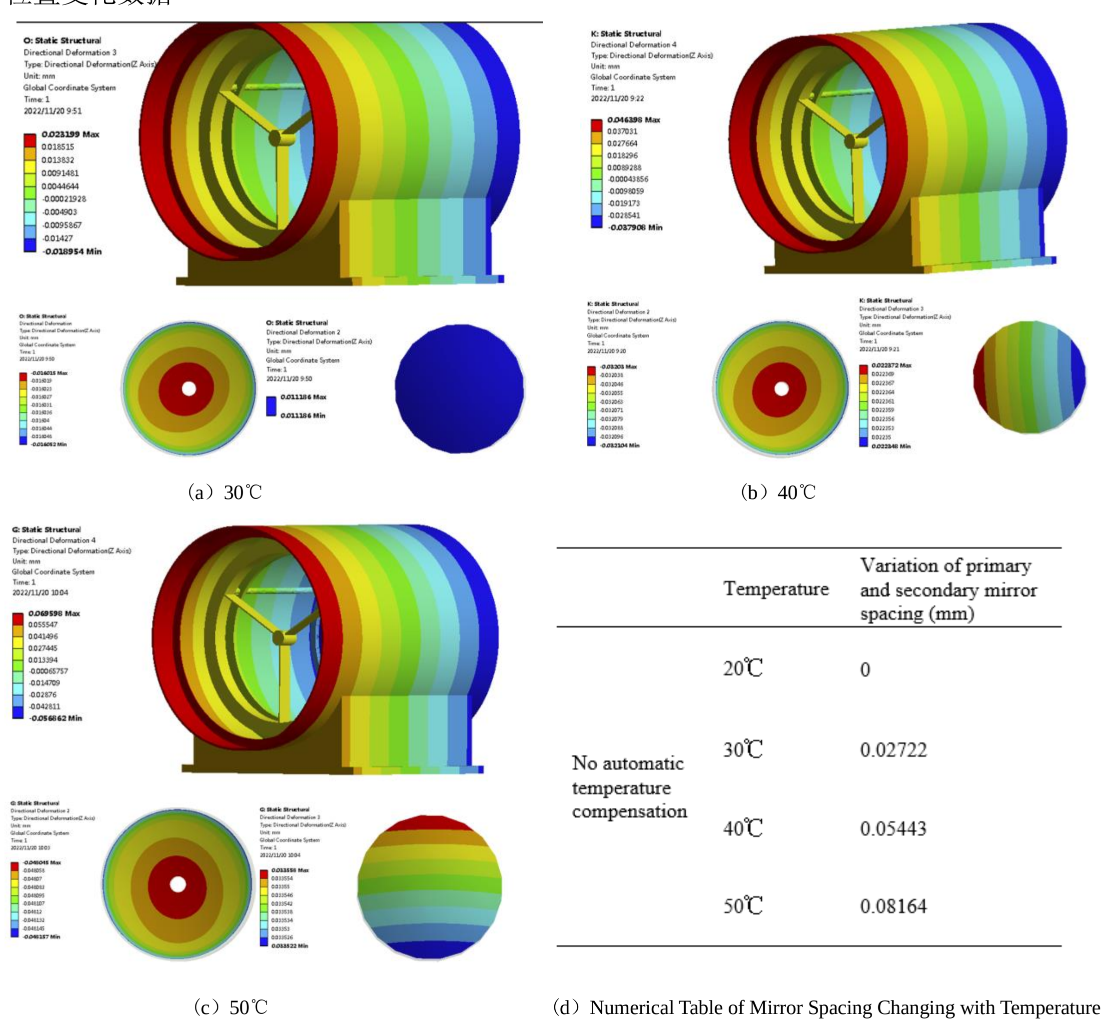


图 4 镜筒坐标系基准图

Fig.4　Reference Map of Mirror Tube Coordinate System

当温度升高到 30℃，40℃和 50℃，扩束光学系统在不设计自动温度补偿机构和设计自动温度补偿机构的两种机理下，主次镜位置变化分析结果如图 5 和图 6，其中(d)为主次镜位置变化数据



(a) 30℃　(b) 40℃

	Temperature	Variation of primary and secondary mirror spacing (mm)
No automatic temperature compensation	20℃	0
	30℃	0.02722
	40℃	0.05443
	50℃	0.08164

(c) 50℃　(d) Numerical Table of Mirror Spacing Changing with Temperature

图 5 未设计自动温度补偿机构

Fig.5　No automatic temperature compensation mechanism is designed

（a）30℃

（b）40℃

（c）50℃

	Temperature	Variation of primary and secondary mirror spacing (mm)
With automatic temperature compensation	20℃	0
	30℃	0.00005
	40℃	0.00009
	50℃	0.00014

（d）Numerical Table of Mirror Spacing Changing with Temperature

图 6 设计自动温度补偿机构

Fig.6 Design of automatic temperature compensation mechanism

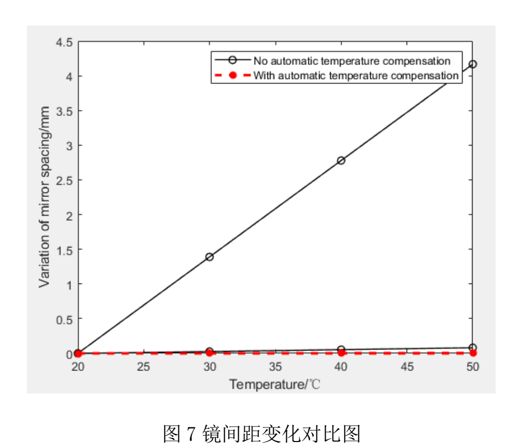


图 7 镜间距变化对比图

Fig.7 Comparison Diagram of Mirror Spacing Change

分析结果表明，在温度升高到 30℃，40℃和 50℃时，不采用自动温度补偿机构的扩束光学系统主次镜变化 0.02722mm，0.05443mm 和 0.08164mm，而采用自动温度补偿机构设计的扩束光学系统主次镜变化分别为 0.00005mm，0.00009mm 和 0.00014mm。并且通过图 7 镜间距变化对比可以看出，采用自动温度补偿机构设计后的镜间距变化量远小于不采用自

动温度补偿机构设计后的镜间距变化量，因此该自动温度补偿机构可以极大地抑制主次镜镜间距的改变。

2.3 系统光学像质分析结果

扩束光学系统在 20℃下理论设计结果如图 8。在温度升高到 30℃，40℃和 50℃时，通过 ZMAX 光学仿真软件分别分析了不设计和设计自动温度补偿机构下的主次镜光学系统像质，分析结果如图 9 和图 10。

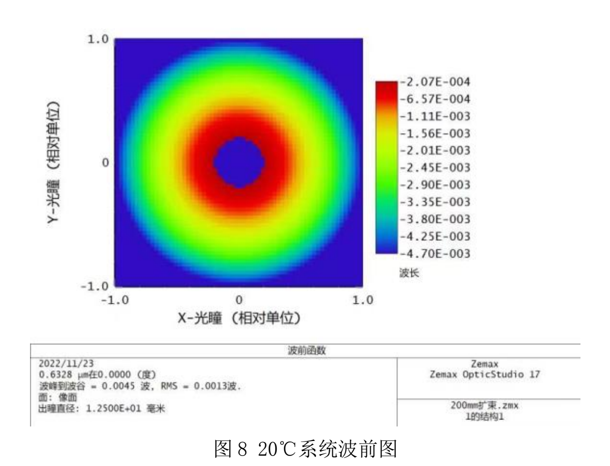
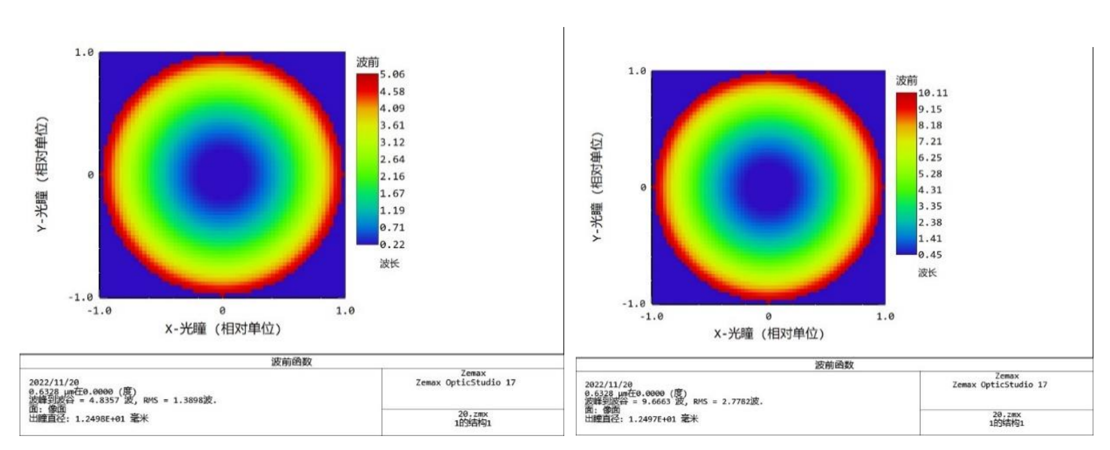


图 8 20℃系统波前图

Fig.8 Wavefront diagram of 20 ℃ system



(a) Wavefront diagram of 30 ℃ system (b) Wavefront diagram of 40 ℃ system

(c) Wavefront diagram of 50 ℃ system

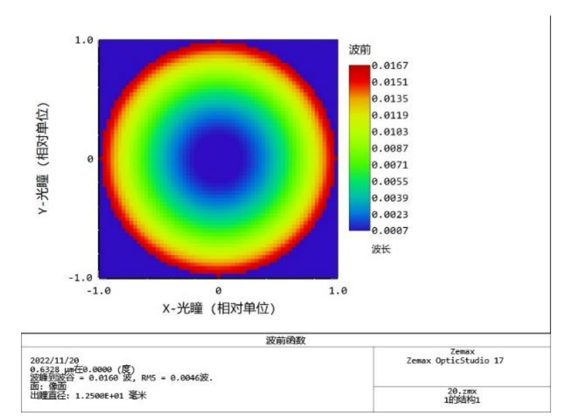
	Temperature	Distance between primary and secondary mirrors	System wavefront error RMS
No automatic temperature compensation	20℃	187.5	0.0013λ
	30℃	187.52722	1.3898λ
	40℃	187.55443	2.7782λ
	50℃	187.58164	4.1656λ

(d) Table of Values of System Wavefront Error RMS Changing with Temperature

图 9 系统波前图（未设计补偿）

Fig.9 Wavefront diagram of 50℃system (no compensation is designed)

（a）Wavefront diagram of 30 ℃ system



（b）Wavefront diagram of 40 ℃ system

（c）Wavefront diagram of 50 ℃ system

	Temperature	Distance between primary and secondary mirrors	System wavefront error RMS
With automatic temperature compensation	20℃	187.5	0.0013λ
	30℃	187.50005	0.0026λ
	40℃	187.50009	0.0046λ
	50℃	187.50014	0.0072λ

（d）Table of Values of System Wavefront Error RMS Changing with Temperature

图 10 系统波前图（设计补偿）

Fig.10 Wavefront diagram of system (design compensation)

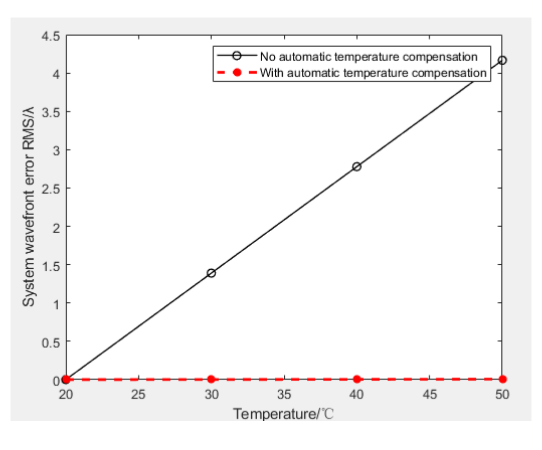


图 11 系统波前误差均方根对比图

Fig.11 RMS Comparison Diagram of System Wavefront Error

通过系统波前分析对比，当扩束光学系统温度从 20℃升高到 30℃，40℃和 50℃时，系统不做温度补偿机构，光学系统的轴上视场波前均方根分别为 1.3898λ，2.7782λ 和 4.1656λ，该状态系统波前变化较大，导致光学系统的出射光平行性变差，无法满足系统波前 RMS≤λ/20 的指标；系统做温度补偿机构，光学系统的轴上视场波前均方根分别为 0.0026λ，0.0046λ 和 0.0072λ，与 20℃状态下的波前最大仅相差 0.0059λ，满足系统波前均方根的指标要求，

可高质量发射光束。

3 结论

扩束系统温度从 20℃升高到 30℃，40℃和 50℃时，不采用自动温度补偿机构设计，扩束光学系统主次镜镜间距分别变化 0.02722mm，0.05443mm 和 0.08164mm，系统波前误差均方根从 0.0013λ 变为 1.3898λ，2.7782λ 和 4.1656λ（λ=632.8nm），无法满足光学成像质量要求；而采用自动温度补偿机构设计后，扩束光学系统主次镜镜间距分别变化 0.00005mm，0.00009mm 和 0.00014mm。系统波前误差均方根从 0.0013λ 变为 0.0026λ，0.0046λ 和 0.0072λ，仍然可以满足光学成像质量要求。因此该自动温度补偿机构可以极大的抑制大温差对扩束光学系统成像质量的影响，为后续扩束系统温度补偿设计提供借鉴参考。

参考文献:

[1] KIM Y S, KIM H S, PARK Y C, et al. Laser beam director system monitoring the alignment state with a null reflector [C] //Proceedings of SPIE. 2007.

[2] 单娟,张鹏,付玉虎. 激光变焦扩束光学系统设计[J].光学与光电技术,2013，11(4):72-76.

SHAN J，ZHANG P，FU Y H. Design of optical zooming system used for collimating laser beams[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013,11,(4):72-76.

[3] 孙向阳,张国玉,段洁. 光机结构的轴向一致性可控方法研究[J].中国激光,2012,39(1):229-234.

SUN X Y, ZHANG G Y, DUAN J. Investigation of controllable axial conformity for opto-mechanical structure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012,39(1):229-234.

[4] CHANG J, WANG Y, ZHANG T, et al. All reflective zoom systems for infrared optics [C] // Proceedings of SPIE. 2006.

[5] 单宝忠,陈恩涛,卢锷,等. 空间光仪光机热集成分析方法[J].光学精密工程,2001,9(4):377-381.

SHAN B Z, CHEN E T, LU E, et al. Thermal/structural/optical integrated analysis of space cameras[J]. Optics and Precision Engineering, 2001,9(4):377-381.

[6] 李冬冬,胡明勇,吴海燕, 等. 低温下（-213℃）补偿机构的设计[J].红外技术,2016,38(8):659-665.

LI D D, HU M Y, WU H Y, et al. The design of compensation mechanism at low temperature of -213℃[J]. Infrared Technology,2016,38(8):659-665.

[7] 管恒睿. 低温离轴反射式准直系统结构设计研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2021.

GUAN H R. Research on structure design of low temperature off-axis reflective collimation system[D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2021.